

Гуляев Е.А., Антонов К.Л., Маркелов Ю.И.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА, МЕТАНА И МОНОКСИДА УГЛЕРОДА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ Г. ЕКАТЕРИНБУРГА

Аннотация. В рамках данного исследования проведен анализ основных закономерностей изменчивости атмосферных концентраций монооксида углерода, углекислого газа и метана на пункте мониторинга в г. Екатеринбурге за период с конца 2016 года по декабрь 2018. Рассмотрены фон, суточная динамика, сезонный ход, межгодовая изменчивость, связь концентраций с метеопараметрами, а также выполнено сравнение с результатами, полученными на других станциях. Полученные результаты позволяют сделать вывод о сильном влиянии местных антропогенных источников на атмосферное содержание исследуемых газовых компонент в окрестностях города.

Ключевые слова: парниковые газы, Picarro G2401, фон, сезонный ход, суточная динамика

Abstract. In the framework of this study, we analyzed the main patterns of variability in atmospheric concentrations of carbon monoxide, carbon dioxide and methane at the monitoring station in Yekaterinburg for the period from late 2016 to December 2018. Background levels, daily dynamics, seasonal variation, interannual variability, the relationship of concentrations with meteorological parameters were considered, as well as a comparison with the results obtained at the other stations. The obtained results allow to conclude that there is a strong influence on the atmospheric content of trace gases from local anthropogenic sources of the city.

Keywords: greenhouse gases, Picarro G2401, background, seasonal variation, daily dynamics

Введение

Диоксид углерода (CO_2) и метан (CH_4) являются наиболее значимыми парниковыми газами (ПГ) в атмосфере. Они, наряду с аэрозолями, составляют основную движущую силу изменения климата, включая повышение глобальной температуры воздуха и экстремальные климатические явления [1]. Согласно текущим наблюдениям, глобально усредненное содержание двуокиси углерода в 2017 году составило $405 \pm 0,1$ ppm, достигнув 146% доиндустриального уровня. Концентрация метана равна 1859 ± 2 ppb, что составляет 257% от показателей 1750 г. За последнее десятилетие среднегодовой темп роста диоксида углерода и метана составил 2,24 ppm и 7,0 ppb соответственно [2]. Такие изменения в основном связаны с ростом влияния процессов человеческой деятельности на окружающую среду, в частности со сжиганием ископаемого топлива и производством цемента, вырубкой лесов, и развитием сельскохозяйственного сектора, а также увеличением числа полигонов твердых отходов.

До недавнего времени мегаполисы и крупные городские агломерации не считались климатически значимыми объектами, искажающими среднемировые концентрации парниковых газов, а их влияние на формирование глобального климата носило локальный характер. Однако в последние годы произошла переоценка вклада городов и все больше исследований газового состава атмосферы проводится именно в условиях городской среды [3, 4]. Хотя города занимают относительно небольшую площадь на планете, они являются доминирующей экосистемой человека, поэтому их влияние на окружающую среду нельзя недооценивать. Следует отметить, что в городских условиях проявляется эффект так называемого “парникового купола”, который оказывает воздействие на прилегающие территории [5]. В результате над городами и их окрестностями формируется специфический микроклимат, отличающийся повышенной температурой воздуха, а, следовательно, наблюдаются особенности распределения ПГ. Недостаток станций мониторинга в масштабах страны приводит к тому, что большая часть Российской Федерации остается малоизученной с точки зрения пространственного и временного изменения газового состава тропосферы.

В данной работе приводятся некоторые результаты прецизионных измерений основных ПГ (CO_2 и CH_4) и окиси углерода (CO) в г. Екатеринбурге за период с декабря 2016 г. по декабрь 2018 г.

Образцы и методика эксперимента

Измерительный комплекс расположен на территории Института промышленной экологии УрО РАН г. Екатеринбург (56,85 с.ш.; 60,65 в.д., 283 м над уровнем моря). Прецизионные измерения в приземном слое атмосферы осуществляются с 2015 г. Екатеринбург является крупнейшим административным и транспортным центром Урала, четвертый по численности населения город страны (более 1,4 млн. человек). В городе функционирует большое количество промышленных предприятий [6]. Екатеринбург расположен в зоне умеренно – континентального климата, граничащего с континентальным. Характерными чертами являются резкая изменчивость погодных условий и ярко выраженная сезонность. Среднегодовая температура – 3°C. Средняя температура самого холодного месяца (январь) -12,6°C, а самого теплого (июль) 19.0°C. Преобладают ветры западных направлений [7]. Для измерения содержания исследуемых элементов в приземном слое атмосферы использовался газоанализатор Picarro G2401, действие которого основано на высокочувствительном спектроскопическом методе CRDS (cavity ring-down spectroscopy). Было доказано, что данный метод является достаточно

стабильным для проведения высокоточных непрерывных измерений [8]. Воздухозаборник расположен на крыше двухэтажного здания (высота – 10 м). Пробы воздуха поступают через фторопластовую трубку диаметром 6 мм с помощью насоса, установленного после прибора. Калибровка прибора производилась с периодичностью раз в месяц, с использованием эталонных газовых смесей российского производства. Данные смеси находятся в трех газовых баллонах (объем 10 л), имеют различную концентрацию изучаемых компонент и в совокупности охватывают весь репрезентативный диапазон значений, в котором работает анализатор. Для углубленного анализа и нахождения закономерностей влияния метеопараметров на содержание в атмосфере малых газовых компонент используется автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс “Метео-2”, предназначенный для измерения параметров воздушной среды: температуры, скорости и направления ветра (воздушных потоков), относительной влажности, атмосферного давления.

Результаты калибровок, записанные в выходной файл, подвергались дополнительной обработке. Для каждого калибровочного образца выделялся временной интервал, в течение которого газоанализатор давал стабильное измерение концентраций. Полученные на основании такой фильтрации данные применялись для нахождения коэффициентов уравнений линейной регрессии, с помощью которых вносились поправки в значения концентраций, измеренных прибором. Аномальные значения в полученных временных рядах подвергались статистической фильтрации на основе гипотезы о логнормальном распределении исходных данных. Измерения вне диапазона 1-99-го перцентиля считались выбросами и исключались из анализа. Далее производилось приведение массива данных к среднечасовым значениям и их синхронизация с метеопараметрами.

В городских условиях при наличии большого числа источников рассматриваемых газов и в отсутствие достаточного количества лесопосадок, отвечающих за их сток, концентрации газовых компонент могут существенно отличаться от региональных и глобальных фоновых значений. Поэтому принципиально важно выделить фоновые концентрации в условиях городской среды. Для нахождения фоновых значений была использована методика, описанная в [9, 10]. На первоначальном этапе был выполнен анализ зависимости концентраций исследуемых компонент от скорости ветра. В процессе анализа было установлено, что для Екатеринбурга характерны повышенные концентрации при скорости ветра до 2,5 м/с. Поэтому часы с данной скоростью ветра и ниже были исключены из общего набора данных. Также были удалены значения с внутрисуточной вариацией, превышающей 1σ

(>1 ppm для CO₂, >8 ppb для CH₄, >30 ppb для CO). Из оставшегося, после такой фильтрации, ряда данных для каждого календарных суток выбирался четырехчасовой непрерывный интервал, который и принимался за фоновое значение. Если в пределах одних календарных суток таких интервалов было несколько, то выбирался интервал с минимальной концентрацией. Если в пределах одних суток такого интервала не находилось, то фон не фиксировался.

Годовое изменение концентрации (тренд) в приземном слое атмосферы вычислялось путем нахождения уравнения линейной регрессии посезонно скорректированным значениям средних концентраций (рассчитанных с декабря по февраль; с марта по май; с июня по август и с сентября по ноябрь соответственно) между двумя последовательными годами [11].

Результаты и обсуждение

Фоновые значения за период 2017 – 2018 г.г. были получены в 61% случаев для CO₂, в 80% для CH₄ и в 74% для CO. Наиболее ощутимые различия значений, измеренных газоанализатором с фоновыми наблюдаются в зимний и летний периоды (Таблица 1). Зимой это можно объяснить влиянием местных локальных антропогенных источников, выбросы от которых являются неотъемлемой частью больших городов и мегаполисов [12]. Летом это можно связать с уменьшением эффективности вертикального перемешивания в зависимости от метеоусловий в ночные и утренние часы, которое наиболее четко выражено в летний период [13].

Таблица 1 – Превышение измеренных концентраций над фоном

Газовая компонента	Зима	Лето	Среднее за год
CO ₂	9,1 ppm	8,2 ppm	7,4 ppm
CH ₄	67 ppb	42 ppb	43 ppb
CO	225 ppb	107 ppb	130 ppb

Полученные результаты имеют хорошую сходимость с исследованиями по превышению фоновых значений концентраций в городских условиях [14].

Динамика концентраций рассматриваемых малых газовых компонент в приземном слое атмосферы Екатеринбурга за период наблюдений имела ярко выраженную сезонную периодичность с максимумами в зимний и минимумами в летний периоды (Рисунок 1). Это может быть связано с усилением влияния в теплое время года природных стоков из атмосферы, обусловленных активизацией вегетационных процессов и дыханием почвы и растений. Следует отметить, что минимальные значения концентрации диоксида углерода

достигаются в июле – августе, а метана и монооксида углерода – в мае – июне. Это может свидетельствовать о временном различии начала и окончания действия механизмов удаления данных примесей из атмосферы.

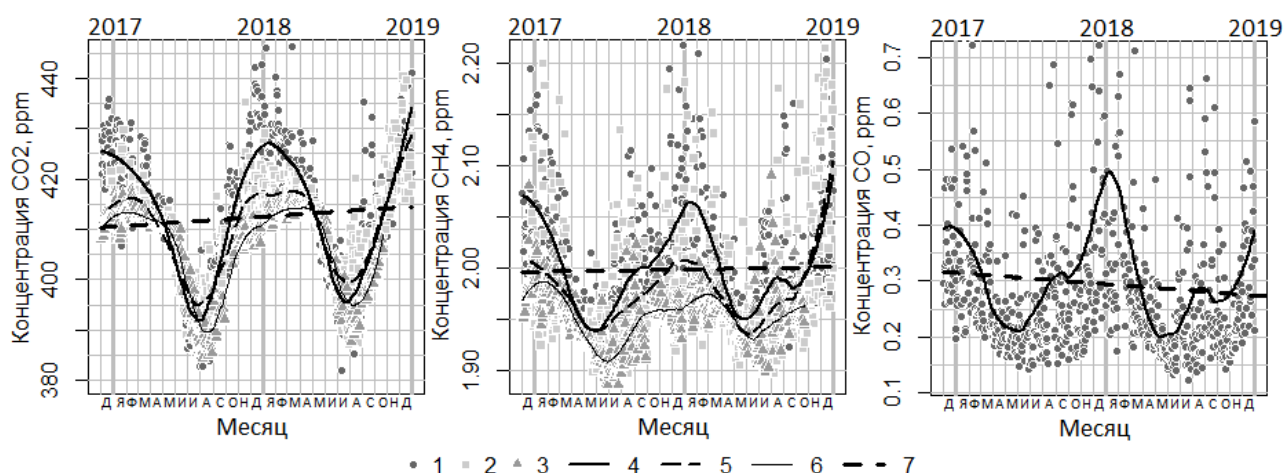


Рисунок 1 – Временные серии исследуемых компонент: среднесуточные значения для Екатеринбурга (1), Лак Ла Бич (2) и Тикси (3), сезонный ход в Екатеринбурге (4), Лак Ла Бич (5) и Тикси (6), а также тренд для Екатеринбурга (7)

За рассмотренный период наблюдений был выявлен монотонный рост концентраций CO_2 и CH_4 . В случае с монооксидом углерода наблюдается снижение его концентрации (Рисунок 1). Среднегодовое изменение концентраций рассматриваемых газов составило 2,1 ppm (CO_2), 2 ppb (CH_4) и 20 ppb (CO). Полученные данные имеют высокую степень схождения с мировым темпом роста по диоксиду углерода, однако существенно расходятся по метану [2].

Важной характеристикой годового хода концентраций является фаза сезонности. Фаза – это период года, в течение которого активизируются процессы удаления изучаемых газов из атмосферы. В мировом научном сообществе под фазой сезонности понимается период времени, когда концентрации, в которых исключен временной тренд, находятся в области отрицательных значений [15, 16]. Процесс рассмотрения периодов начала и окончания фазы, а также ее продолжительности способствует изучению влияния климатических изменений на окружающую среду. В таблице 2 представлены основные характеристики сезонного хода концентраций в районе пункта мониторинга г. Екатеринбурга.

Годовые амплитуды углекислого газа и метана в 2018 г. уменьшились относительно значений 2017 г., а по отношению к монооксиду углерода изменения несут минимальный характер. Полученные результаты не соответствуют ранее опубликованным данным по CO_2 , показывающим, что за

последние 50 лет в Северном полушарии регистрируется увеличение амплитуды годового хода концентрации атмосферного диоксида углерода [17]. Уменьшение рассматриваемой величины по метану может быть связано с увеличением доли антропогенных выбросов городских источников [18]. Этим же фактором можно объяснить изменения минимальных концентраций в сезонном колебании по всем рассматриваемым компонентам. Следует отметить значительное увеличение времени фазы в 2018 г. по CH_4 и CO .

Таблица 2 – Основные характеристики сезонного хода концентраций

ГК	Год	$C_{\text{ср}}$, ppm	A, ppm	max, ppm	d_{max}	min, ppm	d_{min}	τ , дн
CO_2	2017	411,359	32,537	13,77	01.01 (1)	-18,764	27.07 (208)	165
	2018	413,555	31,391	14,11	20.01 (20)	-17,278	23.07 (204)	168
CH_4	2017	1,996	0,126	0,066	01.01 (1)	-0,06	30.05 (150)	185
	2018	2,000	0,121	0,069	16.01 (16)	-0,052	27.05 (147)	225
CO	2017	0,306	0,278	0,18	31.12 (365)	-0,098	26.05 (146)	179
	2018	0,293	0,279	0,194	13.01 (13)	-0,085	27.05 (147)	231

ГК – газовая компонента; $C_{\text{ср}}$ – среднегодовое значение; A – амплитуда; max и min – максимум и минимум в сезонном колебании концентраций; d_{max} и d_{min} – число и день года, когда эти максимумы и минимумы наблюдались; τ – продолжительность фазы.

Определенный интерес представляет сравнительный анализ географических особенностей распределения концентраций. Для этого использовались данные, полученные на российской арктической станции Тикси (72,59 с.ш.; 128,92 в.д., 8 м над уровнем моря) [19] и на канадской станции Лак Ла Бич (54,95 с.ш.; 112,47 з.д., 548 м над уровнем моря) [20]. Выбор станции Тикси обусловлен значимым влиянием на глобальный климат, которое оказывают процессы в атмосфере и гидросфере полярных широт. Канадская станция по своим географическим и климатическим особенностям схожа с пунктом мониторинга в Екатеринбурге. На арктической станции сезонный ход содержания диоксида углерода имеет ярко выраженную форму квазигармонического колебания с широким максимумом в зимний период и узким минимумом в летний (Рисунок 1). Кривая сезонного хода располагается ниже аналогичной кривой для Екатеринбурга. Исключение составляют периоды с мая по июнь, что может быть связано с климатическими и метеорологическими особенностями станции, влекущими более позднее начало вегетационного периода. Сезонный ход CH_4 мало меняется в течение рассматриваемого периода и варьируется в диапазоне 1,9 – 2,0 ppm. Годовые

амплитуды исследуемых элементов также претерпевают значительные уменьшения в 2018 г., а минимальные годовые значения на Тикси достигаются в среднем на 23 дня позже, чем в Екатеринбурге. Данный показатель хорошо соотносится с результатами из работы [9]. На канадской станции летние концентрации CO_2 выше, а зимние существенно ниже значений в Екатеринбурге, но при этом минимальные годовые значения достигаются одновременно. При сравнении сезонных вариаций метана необходимо отметить сентябрь 2018 г., в течение которого значения концентраций уменьшились относительно показателей августа. Эта особенность может быть связана с процессами глобальной циркуляции атмосферы, выраженными в данном случае в широтном переносе метана. Следует подчеркнуть, что рассмотренные станции являются фоновыми и удалены от источников антропогенного загрязнения. Это объясняет существенные различия значений концентраций с показателями Екатеринбурга в зимний период.

Изучение суточного хода является важной частью анализа концентраций рассматриваемых газовых компонент в приземном слое атмосферы, так как он позволяет точнее узнать зависимость концентраций от времени суток для каждого календарного месяца. При построении суточного хода использовались не абсолютные величины, а внутрисуточное отклонение от среднего значения для каждой календарных суток. Также была найдена внутрисуточная дисперсия, показывающая разброс значений концентраций для соответствующего времени суток. Анализ среднемесячной суточной динамики исследуемых газов показал, что максимальные концентрации CO_2 и CH_4 в Екатеринбурге достигаются в ночные и утренние часы в летний период (Рисунок 2). Это можно объяснить возникновением инверсионных условий из-за разности температур, препятствующих вертикальному распространению автомобильных, промышленных и природных выбросов, что приводит к накоплению примесей в нижних слоях тропосферы [13]. Периоды минимумов приходятся на дневные и вечерние часы, что объясняется возникновением активных конвективных потоков (за счёт нагрева суши в дневное время), способствующих перемешиванию воздуха нижних слоёв с более чистым воздухом высоких тропосферных слоёв. Кроме того, в это время суток возникает наиболее активная фаза фотоассимиляции CO_2 и фотохимического превращения CH_4 . Все эти процессы сильнее проявляются в тёплое время года [21]. В зимние месяцы динамика концентраций не имеет четких закономерностей (т.к. влияние естественных источников минимально), но обращает на себя внимание ощутимая внутрисуточная дисперсия, которая может свидетельствовать об изменениях ветрового режима на пункте

мониторинга. Это могут быть как вариации направления и скорости ветра, влекущие изменения вкладов от локальных антропогенных источников, так и вариации условий вертикального перемешивания [13]. Максимальные амплитуды для CO_2 наблюдаются в июле ($36,1 \pm 11,6$ ppb), а для CH_4 (132 ± 95 ppb) – в сентябре.

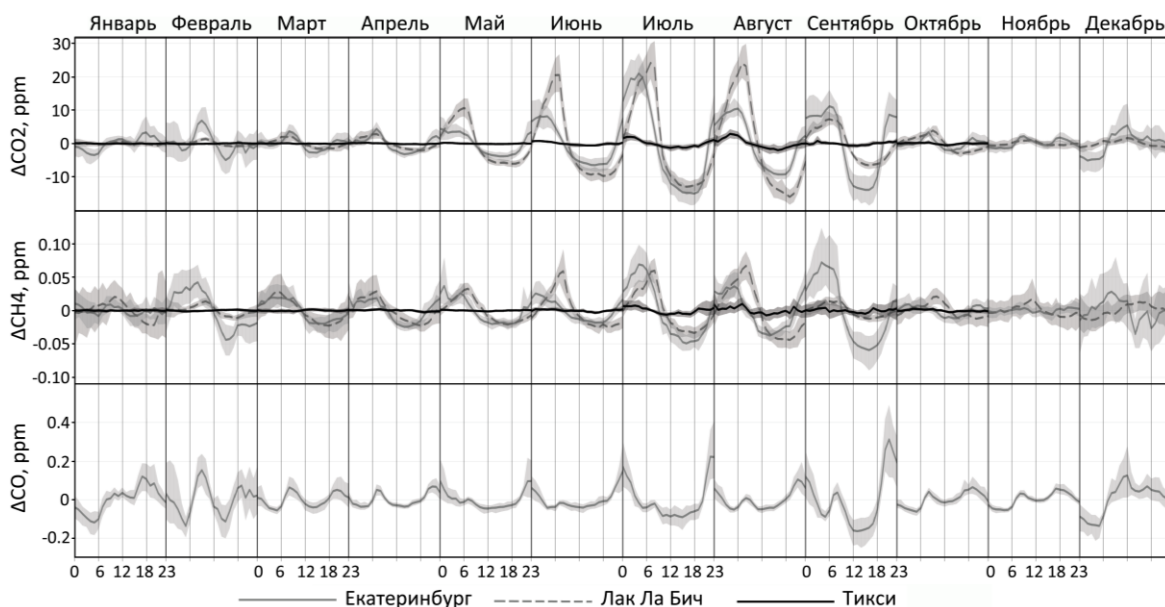


Рисунок 2 – Среднемесечные суточные вариации концентраций исследуемых элементов в 2018 г.

При рассмотрении суточной динамики монооксида углерода необходимо отметить, что его концентрация имеет пики в районе 8:00 утра и после 18:00 вечера. Данная закономерность может быть связана с активизацией процессов деятельности населения, в частности с выбросами от автотранспорта. Это подтверждается при детальном рассмотрении суточного хода в выходные и рабочие дни (пиковые концентрации в рабочие дни выше соответствующих показателей в выходные дни в среднем на $58 - 83$ ppb). Максимальная амплитуда суточного хода CO наблюдается в сентябре и составляет 477 ± 228 ppb.

На станции Тикси динамика суточного хода концентраций CO_2 и CH_4 проявляется крайне слабо. Суточные колебания рассматриваемых газов наблюдаются только в период короткого арктического лета (с июля по сентябрь). Это связано с малостью потоков исследуемых компонент, которые, в свою очередь, связаны с характерным для данного региона суровым, арктическим климатом, скудным растительным покровом и сильными ветрами [22]. Отсутствие каких – либо весомых колебаний в зимний период подтверждает удаленность станции от возможных локальных источников антропогенного загрязнения. На станции Лак Ла Бич, также как и в

Екатеринбурге, суточный ход по диоксиду углерода явно выражен в период с мая по сентябрь, а по метану – с марта по сентябрь. Однако стоит отметить, что достижение максимальных суточных значений, а также периоды роста концентраций в вечерние часы смещены на более позднее время. Максимальные амплитуды проявляются в августе.

Немаловажную роль в определении активности локальных источников малых газовых компонент в условиях мегаполиса играют метеопараметры, в частности скорость и направление ветра. Хорошая обратная корреляция между концентрациями примесей и скоростью ветра указывает на близость источников к пункту измерения, в то время как низкий уровень корреляции означает влияние регионального транспорта [23]. Результаты корреляционного анализа для Екатеринбурга приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сезонные коэффициенты корреляции и уровни значимости между исследуемыми компонентами и скоростью ветра в г. Екатеринбурге

Компонента	Зима	Весна	Лето	Осень
CO ₂	R= -0,5 (p<<0,05)	R= -0,42 (p<<0,05)	R=0,06 (p=0,58)	R= -0,29 (p=0,005)
CH ₄	R= -0,52 (p<<0,05)	R= -0,43 (p<<0,05)	R= -0,53 (p<<0,05)	R= -0,55 (p<<0,05)
CO	R= -0,52 (p<<0,05)	R= -0,46 (p<<0,05)	R= -0,44 (p<<0,05)	R= -0,69 (p<<0,05)

Полученные результаты показывают сильное влияние местных источников практически во всех рассмотренных случаях. Исключениями являются показатели по диоксиду углерода за летний и осенний периоды, которые указывают на преобладание регионального, а возможно дальнего транспорта из других регионов.

Анализ совокупного влияния скорости и направления ветра на концентрации с целью определения возможных источников и стоков показал, что самые высокие мольные доли рассматриваемых компонент наблюдаются при северо – западных направлениях ветра и скорости порядка 2 м/с (Рисунок 3). Необходимо отметить, что особенность сезонного хода концентраций CH₄ и CO в начале календарной осени может быть связана с малым количеством ветров северо – западных направлений в этот период, а соответственно с отсутствием повышенных концентраций, с данного направления. Минимальные значения по CO₂ и CO достигаются в летний период при северо – восточном направлении ветра и скорости 2 – 4 м/с. Концентрация метана при данном направлении и скорости не являлась минимальной.

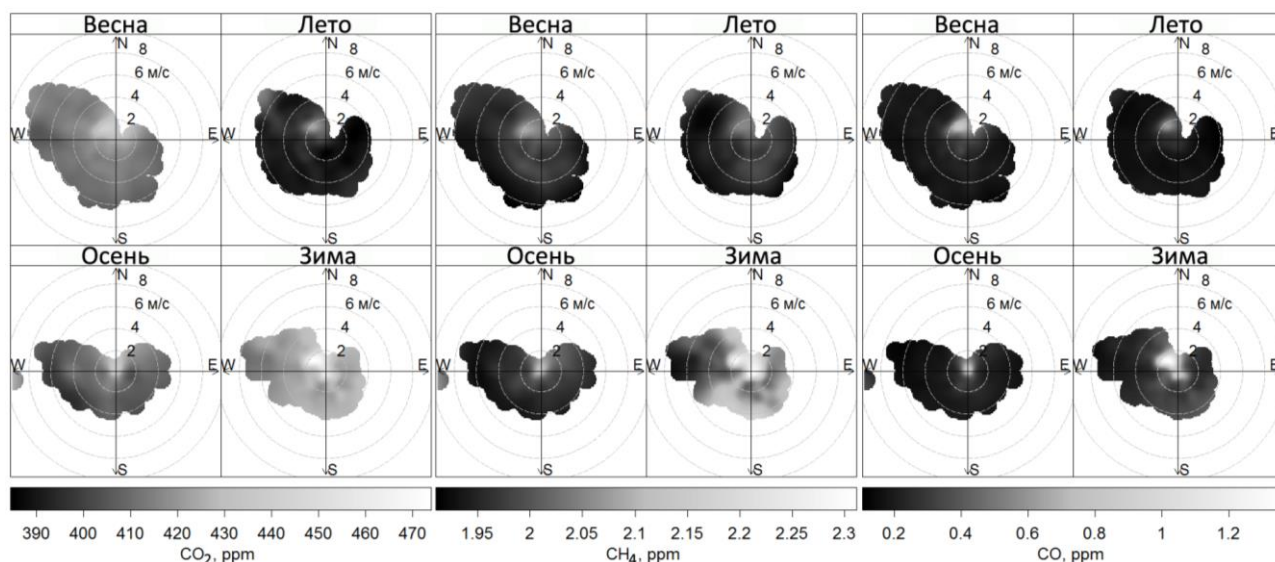


Рисунок 3 – Зависимость концентраций от направления и скорости ветра

Также было установлено, что скорость ветра варьируется в зависимости от времени суток. Минимальные скорости приходятся на ночные и утренние часы, а максимальные – на дневное время. Полученный результат оказывает существенное влияние на специфику суточного хода концентраций изучаемых компонент, который был подробно рассмотрен выше.

Заключение

Проведенный анализ концентраций диоксида углерода, метана и монооксида углерода в приземном слое атмосферы г. Екатеринбурга за период с конца 2016 по декабрь 2018 г. позволил оценить фоновые уровни, которые оказались соизмеримы с результатами других исследований в городских условиях.

На пункте мониторинга в Екатеринбурге наблюдается среднегодовой прирост концентрации диоксида углерода на 2,1 ppm (что хорошо соотносится с глобальным среднегодовым показателем), метана – на 2 ppb, а концентрация угарного газа уменьшалась в среднем на 20 ppb в год.

Амплитуда сезонного хода в Екатеринбурге превышает значения на других рассмотренных станциях. Основные превышения наблюдаются в зимний период, что может являться следствием антропогенных выбросов городских источников. Средние годовые амплитуды за исследуемый период составили 31,964 ppm (CO_2), 0,124 ppm (CH_4) и 0,279 ppm (CO).

Суточный ход по CO_2 проявляется в период с мая по сентябрь, с максимальной амплитудой в июле ($36,1 \pm 11,6$ ppm), а по CH_4 с марта по сентябрь, с максимальной амплитудой в сентябре (132 ± 95 ppb). Суточный ход на станции Тикси практически отсутствует, а на канадской станции имеет схожие временные рамки в годовом рассмотрении, однако существуют различия

во внутрисуточных вариациях. Суточная динамика по СО показала сильную зависимость от процессов человеческой деятельности, что подтверждается при рассмотрении среднесуточных ходов в выходные и рабочие дни.

Связь концентраций с направлением и скоростью ветра позволила сделать вывод о сильном влиянии местных источников на атмосферное содержание исследуемых газовых компонент.

Дальнейшие исследования малых газовых компонент в больших городах и мегаполисах, а также их связь с метеорологическими параметрами является важной задачей, так как полученные результаты позволят лучше понять влияние местных источников на региональные изменения климата.

Библиографический список

1. Pachauri R. K. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R. K. Pachauri, L. A. Meyer. – Geneva : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. – 151 p.
2. WMO Greenhouse Gas Bulletin : The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017. – 2018, 22 November. – Vol. 14. – URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5455 (accessed: 13.05.2020).
3. Observational evidence of high methane emissions over a city in western India / Chandra N., S. Venkataramani, S. Lal [et al.] // Atmospheric Environment. – 2019. – Vol. 202. – P. 41–52.
4. Atmospheric CO₂ and CO at Jingdezhen station in central China: Understanding the regional transport and combustion efficiency / Lingjun Xia, Lixin Liu, Gen Zhang, Bozhen Li // Atmospheric Environment. – 2020. – Vol. 222. – P. 117104.
5. Svirejeva-Hopkins A. Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle / A. Svirejeva-Hopkins, H. J. Schellnhuber, V. L. Pomaz // Ecological Modelling. – 2004. – Vol. 173, Is. 2/3. – P. 295–312.
6. Большая российская энциклопедия. Т. 29 / науч.-ред. совет: Ю. С. Осипов, С. Л. Кравец. – Москва : Большая Российская Энциклопедия, 2015. – 766 с.
7. Погода и климат : справ.-информ. портал. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/28440.htm> (дата обращения: 13.05.2020).
8. High-accuracy continuous airborne measurements of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique / H. Chen, J. Winderlich, C. Gerbig [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2010. – Vol. 3. – P. 375–386.
9. Атмосферная концентрация диоксида углерода на станциях Тикси и Мыс Баранова в 2010–2017 гг. / В. М. Ивахов, Н. Н. Парамонова, В. И. Привалов [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 4. – С. 110–121.
10. Aalto T. Tropospheric methane in northern Finland: seasonal variations, transport patterns and correlations with other trace gases / T. Aalto, J. Hatakka, M. Lallo // Tellus B: Chemical and Physical meteorology. – 2007. – Vol. 59, Is. 2. – P. 251–259.

11. Многолетний тренд концентрации CO₂ в приземной атмосфере над Центральной Сибирью / А. В. Тимохина, А. С. Прокушкин, А. А. Онучин [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 3. – С. 58–64.
12. Annual and seasonal variability of greenhouse gases fluxes over coastal urban and suburban areas in Portugal: Measurements and source partitioning / V. Salgueiro, M. Cerqueira, A. Monteiro [et al.] // Atmospheric Environment. – 2020. – Vol. 223. – P. 117204.
13. Временные изменения концентраций углекислого газа и метана в городских условиях / А. А. Виноградова, Е. И. Федорова, И. Б. Беликов [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43, № 5. – С. 651–663.
14. Methane, carbon monoxide, and carbon dioxide concentrations measured in the atmospheric surface layer over continental Russia in the TROICA experiments / I. B. Belikov, C. A. M. Brenninkmeijer, N. F. Elansky, A. A. Ral'ko // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2006. – Vol. 42, Is. 1. – P. 46–59.
15. Interannual Variability of Atmospheric CO₂ Concentrations over Central Siberia from ZOTTO Data for 2009–2015 / A. V. Timokhina, A. S. Prokushkin, A. V. Pano [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology. – 2018. – Vol. 43, Is. 5. – P. 288–294.
16. Murayama S. Influence of atmospheric transport on the inter-annual variation of the CO₂ seasonal cycle downward zero-crossing / S. Murayama, K. Higuchi, S. Taguchi // Geophysical research letters. – 2007. – Vol. 34, Is. 4. – P. L04811.
17. Enhanced seasonal CO₂ exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems / M. Forkel, N. Carvalhais, Ch. Rödenbeck [et al.] // Science. – 2016. – Vol. 351, Is. 6274. – P. 696–699.
18. Long-Term Trends of Atmospheric CH₄ Concentration across China from 2002 to 2016 / X. Wu, X. Zhang, X. Chuai [et al.] // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, Is. 5. – P. 538.
19. Tiksi Data Center // NOAA : site. – URL: <ftp://ftp.etl.noaa.gov/psd3/arctic/tiksi/> (accessed: 17.04.2020).
20. World Data Center for Greenhouse Gases. – URL: <https://gaw.kishou.go.jp/> (accessed: 17.04.2020).
21. Анализ временной изменчивости концентрации метана в атмосфере по данным наземных наблюдений / Д. К. Арабаджян, Н. Н. Парамонова, М. В. Макарова, А. В. Поберовский // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4. Физика. Химия. – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 204–215.
22. Многолетняя изменчивость характеристик климата района гидрометеорологической обсерватории Тикси / Н. Е. Иванов, А. П. Макштас, С. В. Шутилин, Р. М. Гунн // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2009. – Т. 81, № 1. – С. 24–41.
23. Ramachandran S. Black carbon aerosol mass concentrations over Ahmedabad, an urban location in western India: comparison with urban sites in Asia, Europe, Canada, and the United States / S. Ramachandran, T. A. Rajesh // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2007. – Vol. 112. – D6.